

УДК 551.521.64

К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ НАБЛЮДАЕМОГО ВОЗРАСТАНИЯ ПОТОКА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ОСАДКАХ: ГИПОТЕЗА О РАДИОНУКЛИДАХ НЕ ПОДТВЕРЖДАЕТСЯ

© 2024 г. Ю. В. Балабин¹*, А. В. Германенко¹, Б. Б. Гвоздевский¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Полярный геофизический институт”, Апатиты, Россия

*E-mail: balabin@pgia.ru

Поступила в редакцию 24.08.2023

После доработки 13.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Выполнены оригинальные эксперименты с использованием спектрометра гамма-излучения, установленного на станции космических лучей в Апатитах. Спектрометр проводит мониторинг дифференциального спектра гамма-излучения, приходящего из атмосферы, в диапазоне энергий 0.1–4 МэВ. Анализ спектров гамма-излучения в десятках событий возрастания показал, что эффект возрастания гамма-излучения во время осадков не связан с наличием радионуклидов в осадках или дополнительным выделением радионуклидов из почвы. Характеристики спектров гамма-излучения указывают на метеорологические процессы в атмосфере как на основную причину, вызывающую эффект возрастания.

DOI: 10.31857/S0367676524030063, EDN: QMTUQN

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитной компоненте вторичных космических лучей (ВКЛ) на уровне земли уделяется гораздо меньше внимания, чем другим компонентам ВКЛ (нейтронная, электронно-мюонная), для которых созданы наземные сети детекторов. Причина состоит в том, что электромагнитная компонента (ЭМК) сильно поглощается и рассеивается плотной атмосферой Земли. Так, пробег в атмосфере на уровне моря квантов ЭМК с энергиями в сотни килоэлектронвольт составляет 100–150 м [1], а при энергиях более 1022 кэВ начинает проявляться эффект рождения пар. При этом длина пробега кванта в процессе рождения пар составляет около 350 м и не зависит от энергии кванта [2, 3] в широком диапазоне энергий. Для квантов с энергией много больше порога рождения пар 1022 кэВ основной механизм взаимодействия с атмосферой — именно рождение пар. Сильная подверженность потока ЭМК влиянию локальных условий и метеорологических процессов является существенной помехой для мониторинга этой компоненты.

Генерация ЭМК производится другими компонентами ВКЛ в результате взаимодействия с атмосферой или в процессе распада короткоживущих частиц [2]. Каскадная теория ливней, например, рассмотрена в [4]. Но исследуемый нами диапазон энергий ЭМК намного ниже порога генерации

каскадов, эту часть ЭМК можно назвать мягкой ЭМК, она только рассеивается и поглощается атмосферой. В силу этого потоки ЭМК существенно подвержены воздействию метеорологических процессов, а вариации потока связаны с различными процессами глубоко внутри атмосферы, в том числе внутри дождевых облаков и в приземном слое воздуха. Целью проводимых наблюдений и экспериментов является изучение и понимание механизмов воздействия метеорологических процессов на мягкую часть ЭМК.

НАБЛЮДЕНИЯ И ПРИБОРЫ

Проводимый в ПГИ мониторинг ЭМК показал, что наблюдаются возрастания потока ЭМК во время осадков. К настоящему времени создана сеть станций, где выполняется мониторинг ЭМК помимо Апатитов. Имеется станция на арктическом морском побережье (Баренцбург, архипелаг Шпицберген), есть станции высокогорные (Нейтрино, Северный Кавказ, 1700 м; г. Хулугай, Восточные Саяны, 3000 м), равнинные среднеширотные (Москва, Ростов-на-Дону). На станциях в течение всего года отмечаются возрастания потока ЭМК при осадках. Пример таких возрастаний показан на рис. 1 и рис. 2а. Описание применяемых детекторов и условия наблюдений приведены в [5, 6]. Здесь отметим только, что используются однотипные детекторы на основе сцинтилляционных кристаллов

NaI(Tl) 62 × 20 мм, энергетический диапазон — 20—400 кэВ. Фиксируются интегральные потоки более 100, 200 кэВ. Амплитуда возрастаний доходит до 100% уровня хорошей погоды перед осадками. Наиболее длинный ряд данных имеется для Апатитов (наблюдения ведутся с 2009 г.) и Баренцбурга (наблюдения с 2011 г.). В Апатитах зафиксировано более 1000 событий возрастания амплитудой более 5%. В [7] был проведен статистический анализ характеристик возрастаний для Апатитов и Баренцбурга, показавший их зависимость от геофизических и метеорологических условий.

Поскольку эти используемые детекторы имеют только интегральные выходные каналы, информация о спектральном составе излучения отсутствует, что не позволяет однозначно сделать вывод о природе вариации: обусловлена она наличием радионуклидов в осадках или нет. Хотя косвенные признаки, что эффект не обусловлен наличием радионуклидов в осадках, обсуждались уже в [5]. Во время морской экспедиции в Гренландском море на корабле был установлен детектор гамма-излучения, который зарегистрировал ряд возрастаний в открытом море [8]. Этот факт означает, что эффект не обусловлен загрязнением осадков короткоживущими радионуклидами антропогенного происхождения, поскольку перенос воздушными массами за 1000 км от источника на материке потребует длительного времени, за которое короткоживущие радионуклиды распадутся. Кроме того, на основе накопленных в Апатитах данных о потоках гамма-излучения на протяжении полного цикла солнечной активности (2010—2020 гг.) проведен анализ. Сделан вывод, что число событий и поток

дополнительного излучения, возникающего при осадках, зависят от солнечной активности в той же форме, как и общий поток космических лучей, регистрируемый нейтронными мониторами [9]. Рост солнечной активности приводит к уменьшению числа событий возрастаний и их амплитуды. Этот результат может быть дополнительным указанием на то, что возрастания гамма-излучения при осадках не связаны с радионуклидами.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭМК В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Из сказанного следует, что для дальнейшего выяснения природы наблюдаемого возрастания требуются спектральные измерения. Интегральные каналы не могут обеспечить нужную информацию о наблюдаемых событиях. В Апатитах на станции космических лучей в 2022 г. был установлен и запущен в режиме непрерывного мониторинга спектрометр электромагнитного излучения на диапазон 0.1—4 МэВ. Используется спектрометрический кристалл NaI(Tl) размером 065 × 65 мм, тип получаемого спектра — дифференциальный, время сбора одного спектра составляет 30 мин. Спектрометр размещен в термобоксе рядом с другими детекторами ЭМК на чердаке здания; он находится в стакане, сложенном из свинцовых кирпичей толщиной 50 мм. Поле зрения спектрометра ограничено стенками стакана и соответствует конусу с углом около 90°, обращенным в зенит. Крыша здания представляет собой редкую деревянную обрешетку и железные листы толщиной 1 мм. Спектрометр был калиброван по линиям америция-241, цезия-137,

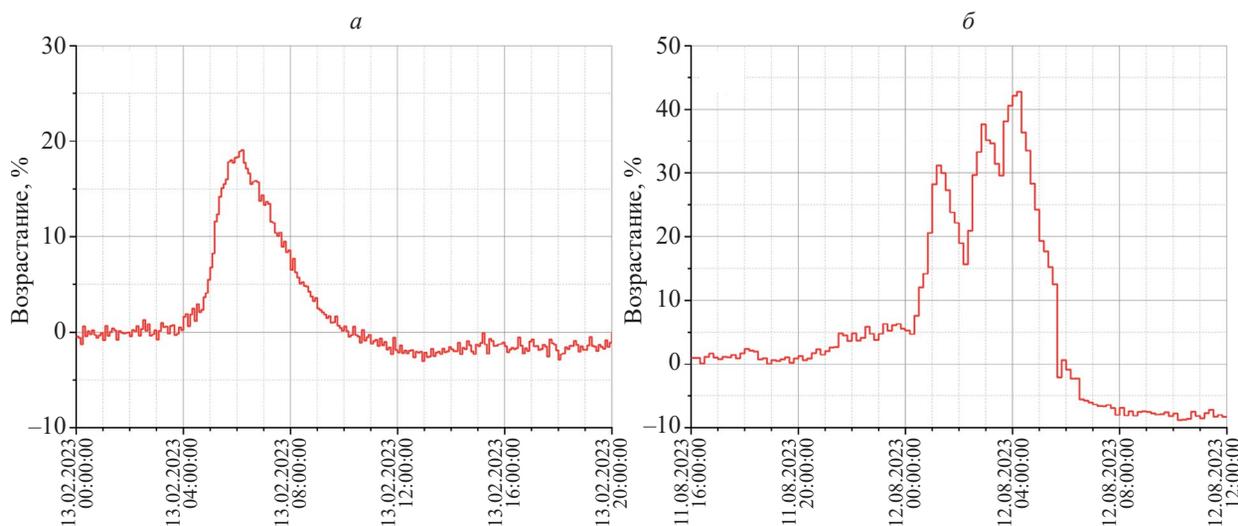


Рис. 1. Профили событий возрастания потока ЭМК во время осадков на станциях: Нейтрино, 13.02.2023 (а); Тащинская, 12.08.2023 (б). Стоит обратить внимание на даты по оси ОХ. Для Нейтрино возрастание произошло в холодный сезон, когда осадки выпадают в виде снега и наличествует глубокий снежный покров. Несколько локальных максимумов на профиле Тащинская соответствуют усилениям интенсивности дождя. Использованы пятиминутные данные каналов >100 кэВ.

калия-40, натрия-22, кобальта-60. Разрешение по линии 660 кэВ (цезий-137) составило около 5%. Также источником цезия-137 кристалл спектрометра облучался при разных положениях источника, когда часть излучения падает на боковую сторону кристалла. Доля неполного поглощения при разных положениях источника не превысила 0.15 от основной линии цезия. На основе данных [1] были определены коэффициенты поглощения $\mu(E)$ излучения в материале крыши в рабочем диапазоне энергий. На основе разработанного в лаборатории программного пакета RUSCOSMICS [10] для данного кристалла была определена эффективность $Q(E)$ регистрации фотонов в зависимости от их энергии в указанном рабочем диапазоне энергий. Далее зависимости $Q(E)$ и $\mu(E)$ используются для внесения поправок в спектральные измерения, чтобы соответствовать спектру первичного излучения, присутствующему в атмосфере. Этот исправленный спектр используется далее во всех анализах и вычислениях.

С середины 2022 г. зафиксировано более сотни событий возрастания гамма-излучения при осадках, для которых получены дифференциальные энергетические спектры. Спектральные измерения показали, что изменения спектра при возрастаниях носят континуальный характер (возрастает поток пропорционально на всех энергиях в широком диапазоне), а сами возрастания не обусловлены вкладом линий радионуклидов, имеющих в осадках. Хотя слабые линии некоторых радионуклидов семейства урана в осадках присутствуют, они не могут обеспечить эффект возрастания во всем диапазоне измерений. Подсчет квантов в линиях радионуклидов показывает, что их число

на порядок меньше, чем общее количество квантов в измеряемом диапазоне, следовательно, радионуклиды, присутствующие в осадках, не могут обеспечить наблюдаемую амплитуду возрастания. Более подробно о спектрах и проведенном анализе приведено в нашей работе [11].

На рис. 2 представлены спектры для события возрастания в Апатитах 01.08.2023. В процессе создания методики обработки спектров использовано следующее положение. Возрастание представляется как добавление к потоку ЭМК, существовавшему до возрастания, т.е. как дополнительный поток. В общем случае — со своим спектром, в котором могут присутствовать и линии радионуклидов. Поскольку спектры дифференциальные, то для получения спектра только дополнительного потока (СДП) необходимо из спектра, измеренного при возрастании, вычесть спектр, полученный перед возрастанием. Одиночный спектр имеет существенные флуктуации, поэтому, по возможности, берется интервал в несколько часов и вычисляется средний спектр. Например (см. рис. 2а), перед возрастанием поток был стабильным с 19 UT до полуночи 31.07.2023, спектры за этот интервал использованы для получения среднего спектра, названного базовым: это спектр ЭМК перед возрастанием. Возрастание держалось на максимуме с примерно постоянным потоком с 01:30 до 03:00 UT 01.08.2023. За этот промежуток имеются три получасовых спектра, они использованы для вычисления среднего спектра возрастания. Разность спектров возрастания и базового дает СДП, т.е. излучение, которое добавилось к основному потоку ЭМК.

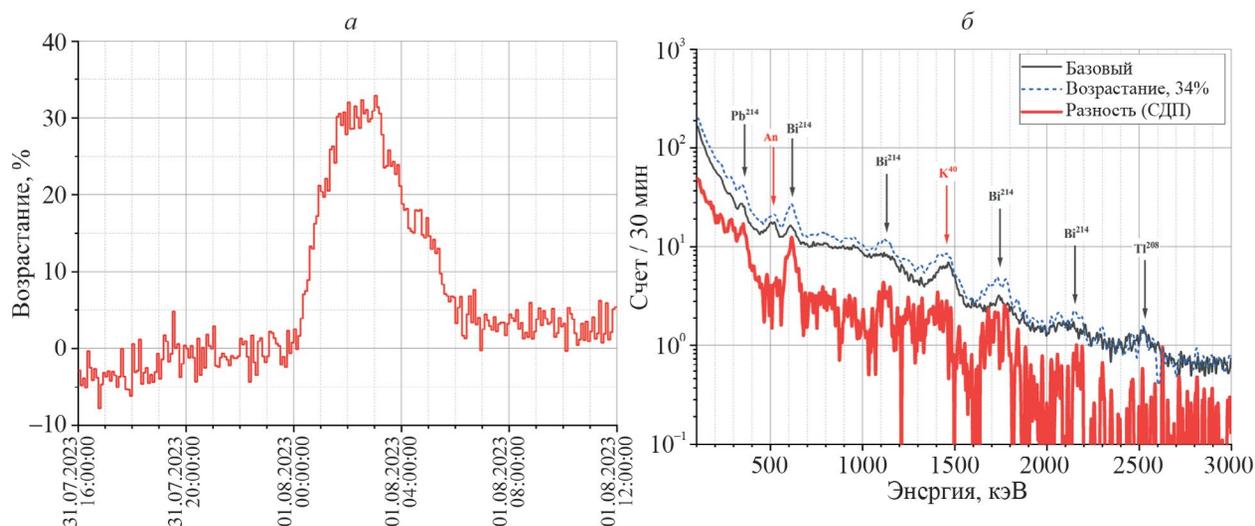


Рис. 2. Пример спектров в одном из событий в Апатитах. Представлено событие возрастания 01.08.2023. Для вычисления базового спектра использованы 10 получасовых спектров с 19 до 24 UT 31.07.2023. Спектр возрастания получен как среднее из трех спектров с 01:30 до 03:00 UT 01.08.2023. Помечены стрелками наиболее явные линии радионуклидов. Для идентификации линий радионуклидов использованы [1, 20].

Опишем спектры более детально. Все приведенные спектры имеют континуальный характер с несколькими линиями радионуклидов семейства урана. Также присутствует аннигиляционная линия 511 кэВ и линия калия-40 1460 кэВ. Первая создается аннигиляцией позитронов, возникающих в атмосфере и окружающих предметах от космических лучей. Природный радионуклид калий-40 присутствует в окружающих телах: древесине, силикатах, стекле колбы ФЭУ и пр. Эти две линии служат маркерами и позволяют контролировать работу спектрометра и его энергетическую шкалу. В спектре, измеренном при возрастании, усиливаются уже имеющиеся в базовом спектре линии радионуклидов (353, 609, 1750 кэВ) и появляются новые (1120 кэВ висмута-214). Стоит обратить внимание, что на разностном спектре полностью отсутствует аннигиляционная линия. Отсутствие аннигиляционной линии на разности означает, что поток этих квантов при возрастании не изменился. Следовательно, плотность позитронов, которые образуются при распаде положительных мюонов, тоже не изменилась. В то же время линия калия-40 на СДП присутствует. Это можно объяснить тем, что осадки содержат пыль: твердые частицы различных минералов и почвы, в составе которых присутствует калий. Самая заметная линия на СДП — линия 609 кэВ, но ее явно недостаточно, чтобы образовать весь спектр от 100 до 2500 кэВ.

На основе спектральных измерений можно заключить, что поток электромагнитного излучения, приходящий на спектрометр, состоит из двух компонент: собственно ЭМК ВКЛ и небольшого числа линий естественных радионуклидов. Первая имеет непрерывный убывающий спектр, вторая, как следует из ее определения, состоит из набора линий. Каждая из этих компонент легко выделяется на спектре, ее вклад легко вычислить. Этот вывод верен для всех трех спектров: базового, возрастания и СДП. В [11] представлен детальный анализ спектров, проведено сравнение различных параметров спектров в десятках возрастаний, сделан вывод: во всех событиях все три спектра (базовый, возрастания и СДП) имеют одинаковую среднюю по спектру энергию, не зависящую от амплитуды возрастания, имеют одинаковую долю вклада линий радионуклидов в полный поток СДП (доля составляет 10—12%), также не зависящую от амплитуды возрастания, и пр. Вывод: радионуклиды, присутствующие в осадках, не являются определяющим фактором для возрастания, а лишь сопутствующим.

Отчетливо видно, что при возрастании происходит сдвиг спектра вверх: потоки возросли на всех энергиях до 2500 кэВ. Такой непрерывный убывающий спектр типичен для тормозного излучения [2]. Процесс генерации ЭМК в атмосфере в целом описан в [12], а развитие электромагнитных каскадов в веществе рассмотрено в [4]. Тормозное излучение возникает в процессе распространения потока

легких заряженных частиц в среде, в нашем случае — в атмосфере. Увеличение потока тормозного излучения наиболее естественно связать с увеличением потока заряженных частиц. Или с изменением плотности среды. Однако отмечена нулевая корреляция возрастаний с вариациями атмосферного давления, а мониторинг потока заряженных частиц (электронов, позитронов и мюонов), выполняемый вместе с мониторингом ЭМК, не показал никакого значимого увеличения потока заряженных частиц. Подробнее об этом есть в [5]. Использовался детектор на основе счетчиков Гейгера. При возрастании ЭМК в 50% возрастание потока заряженных частиц не превышало уровень флуктуация ~3—4%. Несмотря на многочисленные факты, подтверждающие тормозную природу СДП [5], обнаружить значимое возрастание потока заряженных частиц в атмосфере не удалось. Это основной вопрос: СДП имеет все признаки тормозного излучения, а сопутствующего увеличения потока легких заряженных частиц в данном явлении не отмечается.

Был проведен оригинальный и наглядный эксперимент, который показал, что эффект возрастания потока электромагнитного излучения при осадках ни с какими вообще радионуклидами не связан, будь то радионуклиды, выделяющиеся при жидких осадках из почвы (например, радон), или антропогенные и космогенные радионуклиды, вымываемые осадками из атмосферы (например, бериллий-7 или углерод-14) [13]. Суть эксперимента состоит в том, чтобы разместить над спектрометром поглотитель, который бы в умеренной степени поглощал проходящее через него излучение во всем рабочем диапазоне, и определить по изменению интенсивности линий их происхождение. При этом следует использовать материалы из легких элементов, в которых образование вторичных каскадов от высокоэнергичных частиц минимально [12]. Выбрана была вода. Она удобна тем, что легко регулировать слой воды над спектрометром.

Спектрометр, размещенный в свинцовом стакане и работающий в непрерывном режиме измерения спектра электромагнитного излучения, был накрыт пластиковой емкостью с чистой водопроводной водой, до этого отстаивавшейся в плотно закрытой таре около месяца. Отстой воды проводился для того, чтобы короткоживущие радионуклиды (к примеру, радон) полностью распались, если они присутствуют в воде. Хотя наличие каких-либо радионуклидов в воде выявил бы сам спектрометр, показав соответствующие линии, отсутствие новых линий на спектре предпочтительнее. Толщина слоя воды составляла 15 см. Такой слой воды, согласно [14], ослабляет поток квантов примерно в 2—2.5 раза в нашем рабочем диапазоне энергий — до 3000 кэВ. На рис. 3 приведены спектры. Рис. 3а показывает базовые спектры, полученные с открытым спектрометром 05.12.2022, и 06.12.2022 уже с накрытым слоем воды. При этом

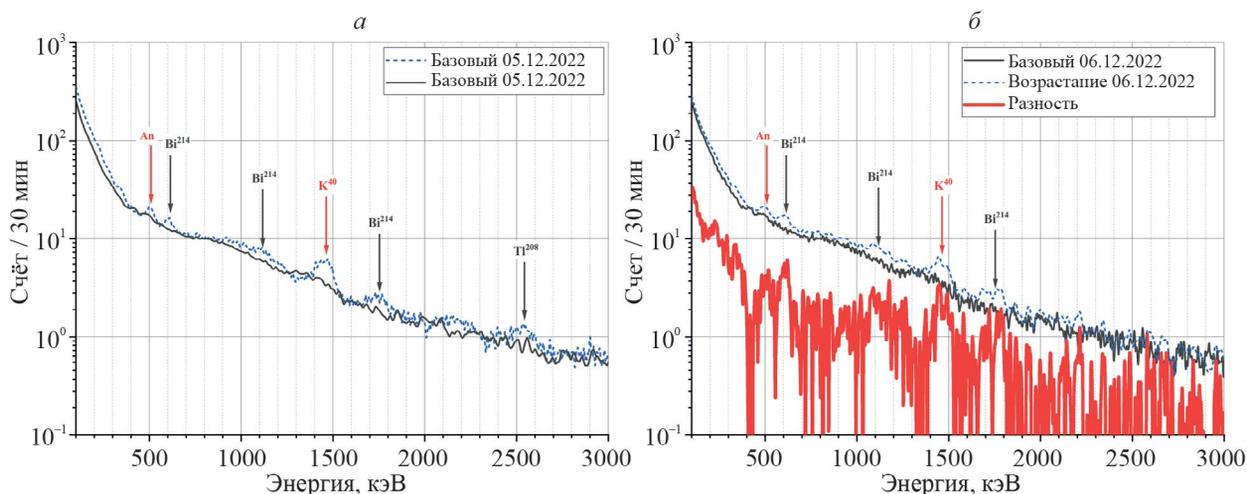


Рис. 3. Спектры, полученные с открытым и накрытым слоем воды спектрометром: сравнение базовых (спектры при ясной погоде) с открытым (05.12.2022) и накрытым слоем воды (06.12.2022) спектрометром (а); спектры базовый, возрастания и СДП во время события возрастания 06.12.2022 с накрытым слоем воды спектрометром (б).

поток ЭМК контролировался также сцинтилляционным детектором с интегральными выходными каналами. По данным интегрального детектора (описание установки мониторинга ЭМК дано в [5]), в канале >100 кэВ в течение 5 и 6 декабря держался постоянный уровень, пока в середине дня 6 декабря не началось возрастание, вызванное интенсивным снегопадом. Можно видеть, что линии висмута-214 и калия-40, а также аннигиляционная линия 511 кэВ на втором спектре подавлены: слой воды существенно поглотил излучение. Однако сам спектр от 500 до 3000 кэВ такому ослаблению не подвергся, спектры в этом диапазоне энергий практически совпадают. При энергиях <500 кэВ наблюдается ослабление примерно в 2 раза. Из этого следует, что излучение <500 кэВ, а также излучение от радионуклидов действительно проходят через слой воды перед попаданием в кристалл детектора, следовательно, их источники находятся вдали от спектрометра. Поток же ЭМК с непрерывным спектром с энергиями >500 кэВ не изменился! Это означает, что либо эта часть ЭМК производится в непосредственном окружении детектора под слоем воды, либо в слое воды происходит дополнительная генерация излучения, компенсирующая поглощение. Такой механизм известен: образование каскадов высокоэнергичными мюонами [12, 15] в веществе.

Еще важнее измерение спектров во время возрастания. Спектрометром, накрытым слоем воды, были зарегистрированы несколько возрастаний. Поток ЭМК параллельно контролировался интегральным детектором, использовался канал >100 кэВ. Спектры одного из событий показаны на рис. 3б. Событие произошло 06.12.2022 и связано с сильным снегопадом, имело амплитуду $\sim 27\%$. Оно подобно летнему событию, приведенному на

рис. 2, с которым будем производить сравнение. Оба события являются типичными событиями средней амплитуды; отдельные возрастания достигали 80–100%, но они редки, одно событие в год, что не подходит для анализа.

Сравнивая СДП (красные линии на графиках) на рис. 2б и рис. 3б, можно увидеть, что линии радионуклидов, прежде всего достаточно интенсивная линия 609 кэВ, как и ожидалось, примерно в 2 раза менее интенсивна для случая накрытого водой спектрометра: происходит поглощение водой проходящего через нее излучения. То же самое можно сказать и о линии 1120 кэВ, но она изначально более слабая, эффект смазан шумами. Участки спектра вне линий при энергиях более 500 кэВ такого же двукратного ослабления не показывают, как это было и при сравнении базовых спектров. Для значений энергии менее 500 кэВ в спектрах наблюдается примерно двукратное ослабление.

Следовательно, регистрируемые сцинтилляционными детекторами кванты электромагнитного излучения в основном создаются в результате каскадных процессов, производимых ВКЛ в окружающих объектах, в основном мюонами высоких энергий [3, 12], которые имеют высокую проникающую способность. Это верно как для ЭМК, регистрируемой в ясную погоду, так и для излучения дополнительного потока, спектр которого получается как разность двух спектров.

Предположение о том, что возрастание ЭМК при осадках связано с взаимодействием заряженных частиц ВКЛ с электрическими полями в облаках, нами выдвигалось в предыдущих работах [5, 11]. В северных широтах грозная активность весьма мала, но возрастания наблюдаются круглый

год, поэтому речь не идет об эффекте “убегающих электронов” [16, 17]. Электрические поля меньшей напряженности не способны ускорять заряженные частицы в столь плотной среде, как нижняя атмосфера [2]. Наша гипотеза рассматривала дополнительный набор энергии частицей, имеющей при рождении достаточно энергии, чтобы достичь уровня земли. Легкие заряженные частицы на эту роль не подходят, поскольку высокоэнергичные лептоны эффективно теряют энергию на тормозное излучение, пробег таких лептонов не зависит от энергии и составляет сотни метров [2]. Мюоны эффекту тормозного излучения не подвержены, в атмосфере они теряют энергию только на ионизацию [3] и при достаточном запасе энергии способны достичь поверхности земли, испытать распад, передав электрону (позитрону) около $1/3$ своей полной энергии [12]. Затем уже легкая энергичная частица в глубине атмосферы производит тормозное электромагнитное излучения. Если такой мюон попадет в электрическое поле, имеющееся между облаками, то он приобретет дополнительную энергию, равную пройденной разности потенциалов. Ионизационные потери мюона не зависят от энергии [12] в очень широком диапазоне энергий, соответственно, в момент распада электрону передастся и часть приобретенной в электрическом поле энергии. Часть этой энергии в конце концов преобразуется в электромагнитные кванты в нашем диапазоне, что будет соответствовать возрастанию. В нашей работе [18] сделаны оценки минимально необходимой напряженности электрического поля в облаках. Оценки производились путем подсчета энергии, приносимой квантами дополнительного потока, и на основе энергетического баланса. Полученная оценка требуемой напряженности поля составила ~ 2 кВ/м, что почти на порядок меньше реально измеренной напряженности электрических полей в слоисто-дождевых облаках [19].

Узким местом этой гипотезы являлось отсутствие всякого возрастания на детекторе заряженных частиц, хотя набор энергии частицей означает сдвиг спектра вверх, т.е. увеличение потока. Проведенный эксперимент с водой дал точную информацию о том, какие мюоны участвуют в генерации ЭМК у поверхности земли. Требуются мюоны, способные вызывать каскады в веществе, т.е. с энергией на порядок больше, чем те, которые дают основной вклад в счет детектора заряженных частиц. По этой причине не наблюдается возрастания на детекторе заряженных частиц.

В [7] представлен статистический анализ возрастных по большому массиву событий, зарегистрированных на паре станций: Апатиты (Кольский полуостров, 67° с.ш.) и Баренцбург (Шпицберген, 78° с.ш.). Возрастные в Апатитах происходят 2—3 раза чаще, амплитуда возрастных также в 1.5—2 раза больше: в Апатитах почти каждое лето регистрируется одно-два возрастных

с амплитудой $>70\%$, тогда как в Баренцбурге наибольшая амплитуда составила 45% за все время наблюдений с 2011 г. При этом в Апатитах летом постоянно наблюдаются кучевые облака (архив в [21]), тогда как в Баренцбурге гроз не отмечено, как и кучевых облаков. Делать обобщающие заключения по наблюдениям всего лишь в двух точках будет ошибочным, однако, за последний год появились данные от станции в средних широтах (ст. Тацинская, Ростовская обл., 48° с.ш.). Это первый пункт наблюдения в средних широтах вблизи уровня моря. Данные от среднеширотных станций, расположенных высоко в горах (п. Нейтрино (Северный Кавказ, 1700 м) и п. Монды (Восточные Саяны, 3000 м)), не в полной мере могут быть приняты: возрастные в высокогорной местности заметно отличаются по своим характеристикам от таковых на уровне моря. Наблюдения за потоком гамма-излучения в станции Тацинская в течение неполных трех летних месяцев показали, что возрастные амплитудой 40—50% (см. рис. 1) типичны для этой местности, а грозовая активность выше (архив в [21]), чем в Апатитах: более половины возрастных в станции Тацинская зарегистрированы во время гроз.

Можно сказать, что проведенными наблюдениями на разных станциях и спектральными измерениями ранее предложенная нами гипотеза в целом подтверждается. Получено указание на то, что эффект вызывают только мюоны с энергией, достаточной, чтобы вызвать каскады при взаимодействии с плотными телами. В случае набора ими дополнительной энергии в электрическом поле они передают энергию в образованный каскад, в итоге в каскаде образуется больше квантов, что и отмечается детекторами.

Вместе с тем предложенная нами гипотеза требует дальнейшей проработки. В частности, необходимы явные доказательства наличия существенных электрических полей в облаках на высоких широтах, что, по-видимому, требует прямых измерений электрических полей в облаках. Также требуется провести тщательные модельные расчеты поведения разных компонент ВКЛ в атмосфере с учетом присутствия в атмосфере электрических полей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен оригинальный эксперимент со спектральными измерениями возрастных потока электромагнитной компоненты вторичных космических лучей при осадках. Эксперимент позволил разделить поток излучения на две части. Одна часть возникает в более протяженном окружающем пространстве и состоит из небольшого набора линии различных радионуклидов. Вторая часть возникает в телах, непосредственно окружающих

спектрометр, имеет непрерывный убывающий спектр. Основной вклад (около 90%) в возрастания вносит вторая часть. Следовательно, возрастания связаны с влиянием метеорологических процессов на потоки космических лучей в атмосфере, а не с переносом осадками радионуклидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев И.С., Мелихов Е.З. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Гайтлер В. Квантовая теория излучения. М.: Изд-во иностранной литературы, 1956.
3. Мурзин В.С. Введение в физику космических лучей. М.: Изд-во МГУ, 1988.
4. Иваненко И.П. Электромагнитные каскадные процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972.
5. Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б., Вашенюк Э.В. // Геомагн. и аэроном. 2014. Т. 54. № 3. С. 376; Balabin Y.V., Germanenko A.V., Gvozdevsky B.B., Vashenyuk E.V. // Geomagn. Aeronomy. 2014. V. 54. No. 3. P. 347.
6. Germanenko A.V., Balabin Yu.V., Vashenyuk E.V. et al. // Astrophys. Space Sci. Trans. 2011. V. 7. No. 4. P. 471.
7. Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 5. С. 659; Balabin Y. V., Gvozdevsky B.B., Germanenko A.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 5. P. 600.
8. Балабин Ю.В., Германенко А.В., Михалко Е.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 3. С. 360; Balabin Y.V., Germanenko A.V., Michalko E.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 3. P. 285.
9. Балабин Ю.В., Германенко А.В., Михалко Е.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 3. С. 365; Balabin Y.V., Germanenko A.V., Michalko E.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 3. P. 290.
10. Германенко А.В., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В. // Труды Кольск. НЦ РАН. 2019. Т. 10. № 8-5. С. 82.
11. Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. и др. // Солн.-земн. физ. 2023. Т. 9. № 2. С. 41; Balabin Yu. V., Germanenko A.V., Gvozdevsky B.B. et al. // Solar-Terr. Phys. 2023. V. 9. No. 2. P. 37.
12. Хаякава С. Физика космических лучей. Ч. 1. Ядерно-физический аспект. Ч. 2. Астрофизический аспект. М.: Наука, 1974.
13. Бураева Е.А., Малышевский В.С., Ратушный В.И. // Глоб. ядерн. безопасность. 2020. Т. 4. № 37. С. 17.
14. ГОСТ 20426—82. Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные. Область применения.
15. Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975.
16. Гуревич А.В., Зыбин К.П. // УФН. 2001. Т. 171. № 11. С. 1177; Gurevich A.V., Zybin K.P. // Phys. Usp. 2001. V. 44. No. 11. P. 1119.
17. Gurevich A.V., Milikh G.M. // Phys. Lett. A. 1999. V. 262. No. 6. P. 457.
18. Balabin Yu.V., Germanenko A.V., Vashenyuk E.V., Gvozdevsky B.B. // Proc. 33rd ICRC (Rio de Janeiro, 2013). P. 1.
19. Rust W.D., Trapp R.J. // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. P. 1959.
20. Lee M.S. // J. Radiat. Protect. Res. 2017. V. 42. No. 3. P. 158.
21. <https://rp5.ru>.

On the question of the nature of the observed increase in the flow of gamma radiation during precipitation: the final closure of the hypothesis of radionuclides

Yu. V. Balabin^{1, *}, A. V. Germanenko¹, B. B. Gvozdevsky¹

¹Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

**e-mail: balabin@pgia.ru*

Original experiments were carried out using a gamma-ray spectrometer installed at the cosmic ray station in Apatity. The spectrometer monitors the differential spectrum of gamma radiation coming from the atmosphere in the energy range of 0.1—4 MeV. Based on the results of these experiments, a final and unambiguous conclusion was made: the effect of an increase in gamma radiation during precipitation recorded at many stations of cosmic rays is not associated with the presence of radionuclides in precipitation or additional release of radionuclides from the soil. The effect is not related to radionuclides at all. The experiments confirm the hypothesis of the influence of meteorological processes on the propagation and interaction of secondary cosmic rays in the Earth's atmosphere.

Keywords: energy spectrum, radionuclides, increase, gamma-radiation, cosmic rays